



**Kandidatarbeten
i skogsvetenskap**
Fakulteten för skogsvetenskap

2019:16

**Skogsskötselprogram för maximering av
kolbindning**

- En fallstudie på Kramfors kommuns skogar

*Forest management program for maximization of carbon
sequestration*

- a case-study on Kramfors municipality's forests

Ingrid Levin & Linnea Tysklind



Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Fakulteten för skogsvetenskap,
Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet/Unit	Institutionen för skogens ekologi och skötsel Department of Forest Ecology and Management
Författare/Author	Ingrid Levin & Linnea Tysklind
Titel, Sv	Skogsskötselprogram för maximering av kolbindning - En fallstudie på Kramfors kommuns skogar
Titel, Eng	<i>Forest management program for maximization of carbon sequestration - a case-study on Kramfors municipality's forests</i>
Nyckelord/ Keywords	<i>Kolbindning, nettoprimärproduktion, boreal skog, klimatförändring, kolsänka, kolkälla, fotosyntes, fotorespiration. Carbon sequestration, primary production, boreal forests, climate change, carbon sink, carbon source, photosynthesis, photorespiration.</i>
Handledare/Supervisor	<i>Tommy Mörling institutionen för skogens ekologi och skötsel. Bitr. handledare Torgny Lind institutionen för skoglig resurshållning.</i>
Examinator/Examiner	Tommy Mörling Institutionen för skogens ekologi och skötsel/ Department of Forest Ecology and Management
Kurstitel/Course	Kandidatarbete i skogsvetenskap Bachelor Degree in Forest Science
Kurskod	EX0911
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet/	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Utgivningsår	2019
Serie	Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

FÖRORD

Denna studie gjordes på förfrågan av Kramfors kommun för att visa hur de på bästa sätt skulle sköta sin skog för att både uppfylla sina egna mål och för att binda så mycket koldioxid som möjligt.

Studien har varit intressant och lärorik samt gett oss nya kunskaper om skogen som kolsänka i ett föränderligt klimat.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Torgny Lind på institutionen för skoglig resurshushållning och Tommy Mörling på institutionen för ekologi och skötsel vid SLU i Umeå. Vi vill även rikta ett tack till Kramfors kommun som gav oss denna idé och möjlighet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	5
SUMMARY	6
1. INLEDNING	7
1.1 Boreal skog som kolsänka	7
1.2 Hur förväntas klimatet att förändras?	8
1.3 Hur binds kolet	8
1.4 Fotorespiration	10
1.5 Kolet i marken	10
1.6 Hur mäts kolbindning	10
1.7 Skogsbruk och kolbindning	12
1.8 Trä som substitut?	13
1.9 Andra studier	13
1.10 HEUREKA PlanVis	14
1.11 Syfte & Hypotes	14
2. MATERIAL OCH METODER	15
2.1 Material	15
2.2 Metod	15
3. RESULTAT	17
4. DISKUSSION	20
4.1 Jämförelse med tidigare studier	20
4.2 Hur mycket kol binds i skogen?	20
4.3 Hur påverkas kolet av olika skötselåtgärder?	20
4.4 Vilket skötelsystem bör kommunen välja?	21
4.5 Styrkor och svagheter med studien	21
4.6 Slutsatser	22
5. REFERENSER	23
6. Bilagor	25
6.1 Bilaga 1. Kramfors register – beräkningar där data saknas	25
6.2 Bilaga 2 - förklaring av restriktioner	26

SAMMANFATTNING

Global uppvärmning och klimatförändringar gör att skogens roll som kolsänka blir allt större. De boreala skogarna utgör en större kolsänka än vad de tropiska och tempererade skogarna gör sammanlagt, det är därför mycket viktigt att förvalta dessa boreala skogar på ett hållbart sätt för att begränsa mängden koldioxid i atmosfären.

Denna studie undersöker vilket skötselprogram som bidrar till en så hög kolbindning som möjligt utifrån specifika mål och krav. Kramfors kommuns skogar och deras mål samt krav på skogen har använts som underlag till analyserna. Kommunens krav var bland annat ett ekonomiskt avkastningskrav på två miljoner kr per år och att skogsbruket följer certifieringssystemet PEFC. Alla analyser gjordes med beslutstödssystemet Heureka PlanVis där olika skötselalternativ togs fram för att hitta ett optimalt skötselprogram för skogen.

Analyserna med heureka visar att ett skötselprogram med nästan enbart fri utveckling skulle ge högst kolbindning. I och med kommunens avkastningskrav var detta inte ett alternativ utan ett skötselprogram där ca 40% av det totala skogsinnehavet lämnades till fri utveckling och resten sköttes med ett modifierat trakthyggesbruk valdes istället. Skötselprogrammet som valdes band totalt 21 966 8,3 ton kol om 97,5 år vilket var en ökning på 75,8% från dagsläget (2019) och även 7,8% mer än vad dagens skötelsystem skulle binda om 97,5 år.

Nyckelord: Kolbindning, nettoprimärproduktion, boreal skog, klimatförändring, kolsänka, kolkälla, fotosyntes, fotorespiration

SUMMARY

Global warming and climate change mean that the role of the forest as a carbon sink is increasing. The boreal forests constitute a larger carbon sink than the tropical and temperate forests do together, it is therefore very important to manage these boreal forests in a sustainable way in order to limit the amount of carbon dioxide in the atmosphere.

This study examines which management program that contributes to the maximization of carbon sequestration based on specific goals and requirements. Kramfors municipality's forests and their goals with requirements for the forest have been used as a basis for the analyzes. The municipality's requirements included an economic return requirement of two million SEK per year and that the forestry follows the certification system PEFC. All analyzes were made with the Heureka PlanVis decision support system, where various maintenance options were developed to find an optimal forest management program.

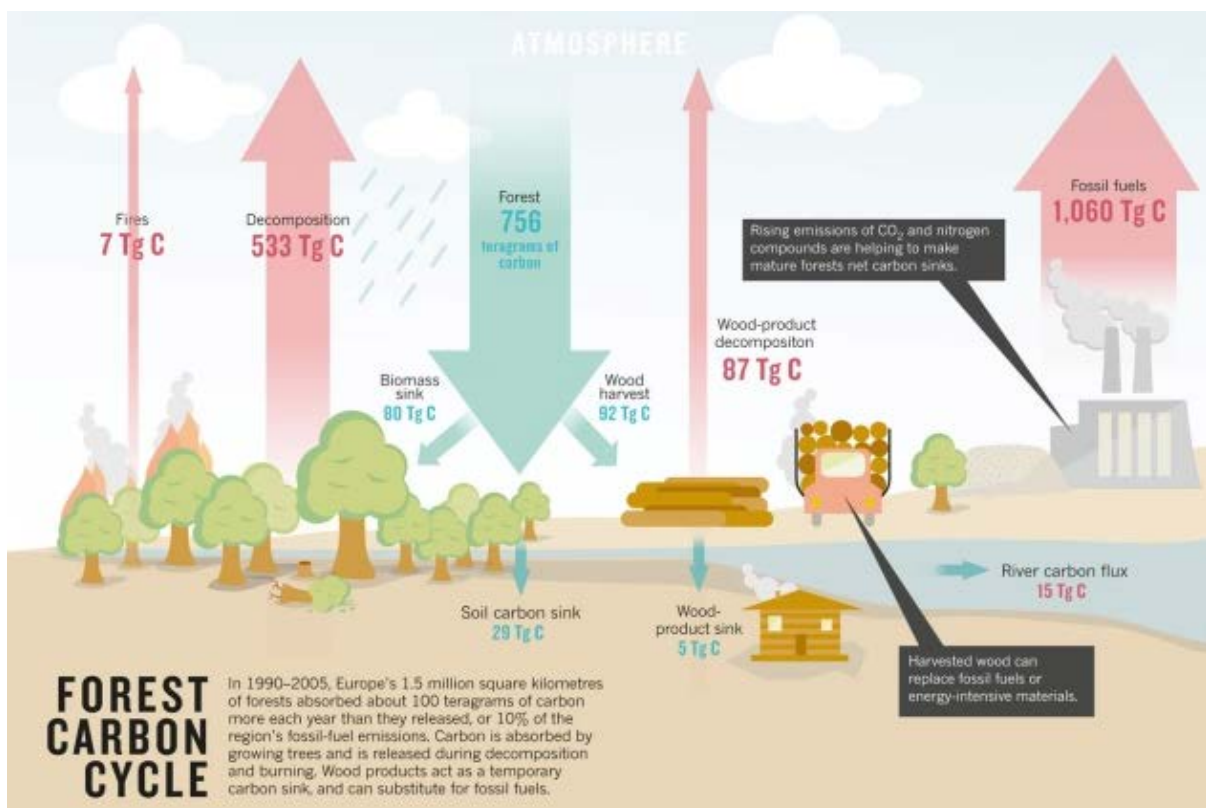
The analyses with Heureka show that a management program with almost only free development would give the highest carbon sequestration. With the municipality's required rate of return, this was not an alternative, but a management program in which about 40% of the forest was left for free development and the rest was handled with a modified even-aged program, was selected instead. The management program, which was selected, contained a total of 219668.3 tonnes of coal in 97.5 years, which was an increase of 75.8% from the current situation (2019) and 7.8% more than today's management system will have in 97,5 years.

Keywords: Carbon sequestration, primary production, boreal forests, climate change, carbon sink, carbon source, photosynthesis, photorespiration.

1. INLEDNING

1.1 Boreal skog som kolsänka

Den globala klimatförändringen är sedan länge ett faktum, skogens roll som kolsänka blir allt viktigare för att minska mängden koldioxid i luften (Nilsson H., 2010). Den tropiska skogen är den som oftast står i centrum då den är utsatt för avskogning på många platser, trots detta utgör det boreala skogstäcket en större kolsänka än vad de tropiska och tempererade skogarna gör sammanlagt. Med kolsänka menas att skogsekosystemet tar upp mer koldioxid än det avger via respirationen (figur 1). Förvaltningen av dessa boreala skogar är därför mycket viktig för att begränsa mängden koldioxid i luften (Naturskyddsföreningen, 2011).



Figur 1. Kolets kretslopp (Bellassen och Lyssaert, 2014)
Figure 1. The carbon cycle (Bellassen och Lyssaert, 2014)

De boreala skogarna är beroende av det kärva klimatet på de platser där skogen växer, vilket mestadels är på de nordliga breddgraderna. Boreala skogar maximerar sin kolbindning i temperaturer kring 15–20 grader, och den årliga kolbindningen kan variera mellan olika år beroende på klimatet. Vid högre temperaturer avger träden mer koldioxid än de förmår binda till följd av respirationsförluster (Bergh et al., 2000). Temperaturökningen i samband med den globala uppvärmningen beräknas bli som störst på de nordliga breddgraderna, vilket medför att de boreala skogarna är särskilt hotade (Bernstein et al., 2007).

De boreala skogarna växer på marker där det på vinterhalvåret blir för kallt för att fotosyntes och respiration ska fungera. Temperaturen i kombination med att marken fryser medför att

träden går i dvala för att spara på sin energi, vilket i sin tur resulterar i att kolbindningen uteblir under vinterhalvåret (Bergh et al. 2000, Morén, Grelle, Lindroth, 2000). Vädret spelar en stor roll för fotosyntesen och respirationen och på så vis kolbindningsförmågan. Vid mulet väder minskar mängden solexponering, vilket orsakar att både fotosyntes och respiration minskar jämfört med en solig dag med högre temperaturer (Bergh et al., 2000).

Nästan hälften av världens boreala skogar är äldre naturskogar, dessa skogar står för en mycket stor del av kolförrådet. I Sverige är andelen skog av naturskogskaraktär under 10% av skogsarealen, denna skog återfinns mestadels i naturreservat eller nationalparker (Cedergren, 2008).

Den globala uppvärmningen leder till att de gamla boreala naturskogarna kan omvandlas till kolsänkor, detta eftersom uppvärmningen bidrar till en ökning av naturliga störningar såsom bränder och insektsangrepp (Nilsson H., 2010). Dessa störningar skapar luckor i skogen och medför naturlig förnyring, vilket resulterar till att kolbindningen i skogen successivt kan öka igen på dessa platser tills en slutenhet uppnås (Cedergren 2008, Eichhorn och Evert, 2013). Bränderna påverkar även kolcirkulationen då de återför koldioxid till atmosfären genom förbränningen av biomassa (Nilsson H., 2010). En allt för stor temperaturökning, om ca 3–5 grader, skulle dock kunna orsaka omfattande skogsdöd och torkstress. Ökad temperatur ökar också mängden kol som avges i den äldre skogen vilket skulle förvandla kolsänkan till en kolkälla (Eichhorn och Evert, 2013).

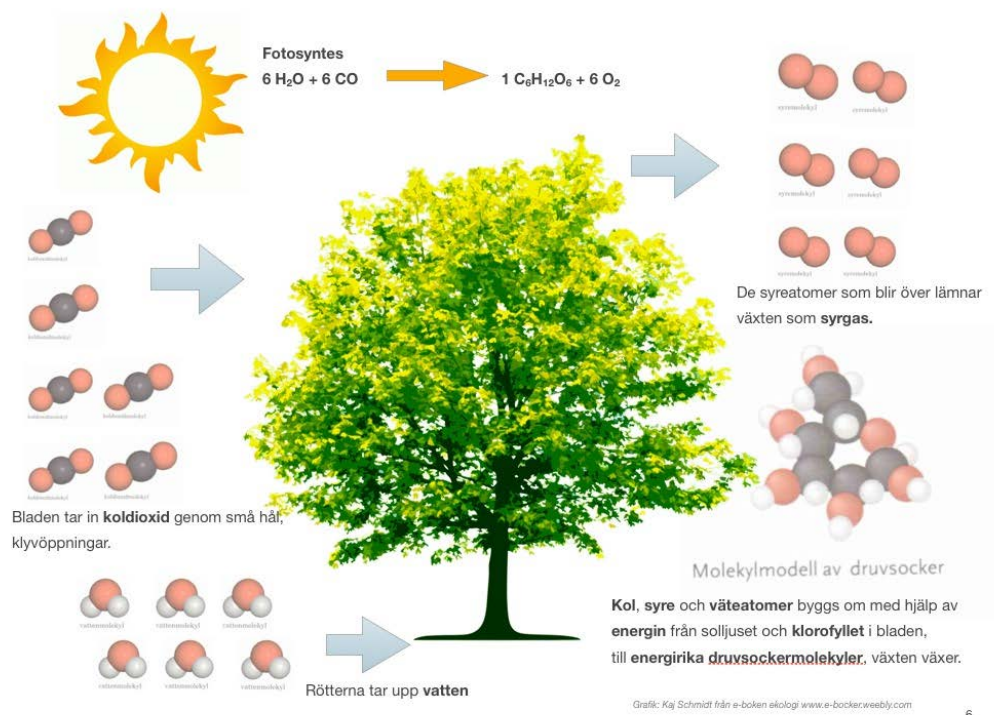
1.2 Hur förväntas klimatet att förändras?

Det är svårt att avgöra exakt hur klimatet kommer att förändras under de kommande 100 åren. En annan sak som kan konstateras med relativt hög säkerhet är att de framtida klimatförändringarna kommer att bli mer dramatiska och få större och mer drastiska effekter på både ekosystem och arter världen över. I en studie i östra USA där man undersökt olika klimatscenarion, kom man fram till att artrikedomen kan komma att öka med ett varmare klimat (Iverson och Prasad, 2001).

Det varmare klimatet bidrar till en förlängning av vegetationsperioden, vilket gör att tillväxten i skogen ökar, en ökad tillväxt medför att träden binder mer kol för att bygga upp mer biomassa (Lindroth mfl., 2017). I normala fall skulle tillgången på näringsämnen, främst kväve (N), och vatten begränsa tillväxten, men temperaturökningen medför även att nedbrytningen i marken ökar, och på så vis frigörs mer kväve i marken. Samtidigt visar prognoser också att nederbörden beräknas öka med en stigande temperatur (R.De Long et al., 2016). Om klimatet blir för varmt sparar trädet på vatten, vilket medför att klyvöppningarna stängs, och på så vis uteblir fotosyntesen. Barrträden har speciellt anpassade klyvöppningar på barren för att trädet ska tåla kyla och torka utan att bli uttorkade (Zetterlund, 2017).

1.3 Hur binds kolet

Kolet binds genom att trädet, liksom alla gröna växter, fotosyntetiserar luftens koldioxid till syre och glukos/stärkelse med hjälp av solenergi och vatten (figur 2) (Eichhorn och Evert, 2013).



Figur 2. Fotosyntes (Peda.net, u.å).

Figure 2. Photosynthesis (Peda.net, u.å).

Balanserad reaktion: $3\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ljus} \rightarrow \text{C}_3\text{H}_2\text{O}_3 + 3\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ (3 koldioxid + 6 vatten \rightarrow ljus \rightarrow glukos + 3 syre + 3 vatten).

Anledningen till att vatten finns med i båda leden är för att energin från delningen av 6 vattenmolekyler behövs för att omvandla 3 koldioxidmolekyler till stärkelse och glukos ($\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_3$). Senare i processen, där de 3 koldioxidmolekylerna omvandlas till stärkelse och glukos, avlägsnas några väteatomer från vattenmolekylen, dessa väteatomer används sedan för att avlägsna syreatomer från kolet genom att tillsammans bilda vatten (Eichhorn och Evert, 2013).

Glukosen som bildas ger trädet energi för att underhålla de livsviktiga funktionerna, stärkelsen däremot lagras kvar i blad och barr som energilager. Detta energilager lagras kvar över vintern och på våren ger den energi till utvecklingen av nya blad och barr (Zetterlund, 2017).

Kolet från koldioxiden finns lagrat i stärkelsen och glukosen och binds i trädet genom att dessa används som energi vid uppbyggnad av ny biomassa. Under fotosyntesen bildas syre som frigörs via klyvöppningarna, vattnet som bildas vid fotosyntesen vädras också ut genom klyvöppningarna (Eichhorn och Evert, 2013). Denna process där syre och vatten frigörs via klyvöppningarna kallas för autotrof respiration. Även en del av koldioxiden återgår till luften via klyvöppningarna (Zetterlund, 2017). Mängden kol i form av stärkelse som finns kvar efter respirationen är den mängden kol som finns tillgänglig för att bygga upp biomassa i bland annat rötter, stam och barrmassa. Denna kolmängd kallas för nettoprimärproduktion (NPP) (Eichhorn och Evert, 2013).

1.4 Fotorespiration

I blad och barr finns speciella enzym som kallas för rubisco, detta enzym är det som i fotosyntesen, med hjälp av solens energi, omvandlar koldioxid till kemisk energi i form av stärkelse/glukos och sedan avger det syre som bildas i samband med fotosyntesen. Enzymet har förmågan att binda både syre och koldioxid, vilket gör att enzymet ibland gör fel och tar upp en syremolekyl och frigör en koldioxidmolekyl, istället för att göra tvärtom som under fotosyntesen. Detta medför att trädet förlorar energi och släpper ut koldioxid (Eichhorn och Evert, 2013).

1.5 Kolet i marken

Det är inte bara uppbyggnaden av biomassa och de livsviktiga processerna i träd och växter som avger koldioxid till atmosfären. Marken står för en stor del av koldioxidutsläppen från respiration hos bland annat markorganismer och rötter. I en studie utförd på Island visade resultaten att om marktemperaturen höjs, i och med klimatförändringen, kan kolbindningar i träden öka upp till och med en temperaturökning på 3 grader. Markrespirationen ökade med temperaturhöjningen vilket medförde att markens ekosystem utgjorde en kolkälla (André och Bondesson, 2014).

Det varmare klimatet påverkar även processerna i marken. Temperaturstyrda processer, såsom nedbrytning av döda växt och djurdelar (förna), ämnesomsättning och kolbindning i marken påskyndas. En snabbare nedbrytning av förna medför att större mängder av koldioxid frigörs än vad som tas upp av växter och markorganismer, detta leder till att marken blir en kolkälla då koldioxiden frigörs till atmosfären. Nedbrytningen är en viktig process eftersom den omvandlar dött organiskt material, såsom döda träd och växtdelar och organismer, till koldioxid. Den omvandlade koldioxiden frigörs både i marken och en del avgår även till atmosfären (R. de Long et al., 2016). Koldioxiden som frigörs i marken används av de organismer som utför nedbrytningen, nedbrytningen är väldigt viktig då den tillsammans med fotosyntesen avgör hur mycket kol som ekosystemet binder. Nedbrytningen styr även tillgången på andra, för träden, viktiga näringsämnen i marken, främst tillgången på kväve och fosfor (R. de Long et al., 2016).

Högre utsläpp av kväve kan bidra till ökad kolbindning i de boreala skogarna. Eftersom kväve ofta är det tillväxtbegränsande ämnet på skogsmark, kan en större mängd tillgängligt kväve stimulera träden till ökad tillväxt samt ökad mängd biomassa. En tilltagande mängd biomassa medför också en ökad bindning av koldioxid och på så vis en minskad mängd atmosfärisk koldioxidhalt (Nadelhoffer et al., 1999).

I kalmarksfasen (hygge) är det markvegetationen som står för majoriteten av fotosyntesen. Marktemperaturen höjs i och med den ökade solinstrålningen, vilket medför en ökad markrespiration och koldioxid avyttras ut i atmosfären. När beståndet successivt sluter sig ökar beskuggningen av marken, och på så vis minskar markrespirationen (Bergh et al., 2000).

1.6 Hur mäts kolbindning

Genom att mäta de snabba luftströrelserna ovanför en skog och registrera variationen i koldioxidhalt kan man räkna ut koldioxidflödet och på så vis hur stor andel skogen binder

respektive avger. Dessa mätningar utförs med ett så kallat turbulensinstrument (figur 3). Denna metod kallas för flödesmetoden (Morén, Grelle, Lindroth, 2000).



Figur 3. Turbulensinstrument (ICOS 2018).

Figure 3. Turbulence Instrument (ICOS 2018).

Sverige är till största delen täckt av skog, vilket innebär att mätstationerna huvudsakligen är placerade på skogsbevuxna platser. I Sverige finns 3 mätstationer på skogsbevuxna platser, de är lokaliserade på Svartberget (Västerbotten), Norunda (Uppland) samt Hyltemossa (Skåne). Skogen på Svartberget domineras av boreal tall (*Pinus sylvestris L.*) och marken är relativt näringsfattig och jordmånen är morän av varierande grovlekar. På mätstationen i Norunda växer både boreal tall och boreal gran (*Picea Abies L.*), marken här är väldigt stenig och jordmånen liknar en podsol. Skogen vid mätstationen i Hyltemossa domineras av tempererad gran, och marken här är en blandning av sand och sediment (ICOS, 2018).

Det går även att mäta graden av kolbindning genom att studera förändringar av kolhalt i de levande träden i skogen. Denna metod kallas för förrådsmetoden. Denna metod har en svaghet

då den inte ger lika detaljerade mätningar som flödesmetoden. Mätningar genomförs som tidigast med tio års mellanrum, detta eftersom processen med att binda kol är mycket långsam. De glesa mätningarna resulterar i en dålig tidsupplösning, vilket gör det svårt att analysera vilka händelser som medfört en förändring i kollagret. Flödesmetoden har en mycket högre tidsupplösning med flertalet mätningar varje sekund (Morén, Grelle, Lindroth, 2000).

1.7 Skogsbruk och kolbindning

Skogen binder olika mycket koldioxid under sin utveckling, i början, under kalmarksfasen och påföljande plant och ungskogsfasen avger skogen och marken mer koldioxid än vad den förmår att binda (Klimatet och Skogen 2017). När skogen slutligen blir sluten når nettoprimärproduktionen sin topp och som mest med koldioxid binds, efter denna fas avtar sedan kolbindningen ju äldre skogen blir (Bergh et al., 2000). En brukad skog avverkas när tillväxten och nettoprimärproduktionen kulminerar och sedan börjas allt om på nytt. Eftersom en naturskog inte brukas (ingen avverkning) fortsätter träden bara att växa och eftersom kolbindningen avtar med åldern på träden är kolbindningen inte lika hög i en naturskog (Skogsstyrelsen 2014; Eichhorn och Evert 2013). Ju äldre naturskogarna blir desto större risk är det att de drabbas av en naturlig störning såsom en storm eller en brand, detta medför att luckor bildas i beståndet där skogen kan föryngras. I dessa luckor är därför kolbindningar högre än i den äldre skogen (Cedergren, 2008; Eichhorn och Evert, 2013).

I de förvaldade boreala skogarna har man större möjlighet att kontrollera utsläppen av koldioxid och andra växthusgaser genom val av skötselsystem och strategier. Det är viktigt att granska valen både på kort och lång sikt, det som är optimalt om ca 100–200 år kanske inte alls är optimalt under de första decennierna. Det finns olika beprövade skötselstrategier som syftar till att öka mängden bundet kol i skogen. Ett exempel är att öka omloppstiden (Bellassen och Luyssaert, 2014).

Vid trakthyggesbruk påverkas marken negativt efter avverkning då växtdelar bryts ner och på så vis uppstår en negativ kolbalans. Dock är tillväxten högre i trakthyggesbruket under senare faser, vilket gör att kolbindningen ständigt ökar. Kontinuitetsskogsbruk är hyggesfritt, och på så vis utesluter man att en negativ kolbalans bildas. Eftersom tillväxten inte är lika hög i skog som sköts med kontinuitetsskogsbruk är inte kolbindningar lika hög som i trakthyggesbruk på kort sikt (Bergh och Lindroth, 2018).

Nackdelen med att bruka skogen är att det vid avverkning och uttag av biobränsle, såsom stubbskörd, släpps ut stora mängder koldioxid från marken (Bellassen och Lyassaert, 2014). Brukade skogar får ett annat utseende än naturskogar eftersom dess strukturer skiljer sig åt, en brukad skog är ofta enskiktad och har ett dominerande trädslag (Naudts et al., 2016).

Det vore svårt att övergå från trakthyggesbruk till kontinuitetsskogsbruk i de svenska skogarna då en tillväxtförlust skulle ske, samtidigt som alternativen av föryngringsmaterial och val av föryngringsmetod skulle minska. Kontinuitetsskogsbruk lämpar sig även bättre för gran än tall, vilket medför att andelen gran i Sverige skulle öka om de flesta skogarna skulle omvandlas till kontinuitets brukade skogar (Bergh och Lindroth 2018).

En annan negativ följd av kontinuitetsskogsbruk är att man inte kan ta ut biomassa till bioenergi, vilket gör att substitutet till de fossila bränslena minskar. Den biologiska mångfalden förväntas dock öka om skogen sköts med kontinuitetsskogsbruk (Bergh och Lindroth, 2018).

Forskare är överens om att det skötselsystem som medför högst tillväxt, och därmed högst kolbindning, är det som är viktigast för klimatnyttan. Lindroth och Bergh hävdar att gödsling har en stark positiv effekt på klimatet då den minskar markandningen där koldioxid frigörs samtidigt som upptaget av koldioxid i trädskronorna ökar. En mer långsiktig åtgärd som medför högre kolbindning är att välja genetisk förädlad material som föröngingsmaterial (Bergh och Lindroth, 2018).

Under de senaste 100 åren har kolförrådet i Sverige ökat, detta beror delvis på att skogsvårdslagen införts vilken kräver att man återbeskogar marken efter avverkning samt att hänsyn visas vid vissa miljöpåverkande åtgärder som tex skogsdikning. En annan faktor som bidragit till kolbindningens ökning är att avverkningen alltid är lägre än tillväxten, vilket bevarar skogens produktionsförmåga och på så vis även kolbindningsförmåga (Skogsstyrelsen, 2018).

1.8 Trä som substitut?

Skogen absorberar koldioxid från atmosfären under sin tillväxt. En kontinuerligt brukad skog bidrar till minskningen av koldioxidutsläpp till atmosfären genom bland annat det ökade lagret av kol i olika träprodukter; och användningen av biomassa som substitut för fossila bränslen och energikrävande material, såsom betong och stål. Världens skogar står för ungefär 30% av den totala kolbindningen, och två tredjedelar av världens skogar räknas som brukade (Lundmark et al., 2014; Bellassen och Luyssaert, 2014).

1.9 Andra studier

Anna-Ida Bylund gjorde år 2015 en studie på hur kolbalansen påverkas av olika skötselstrategier på kort och lång sikt i Kronobergs län, Bylund undersökte även om en ökad areal avsatt skog för naturvårdsändamål och generell hänsyn medförde en högre kolbindning än dagens skogsbruk.

Resultatet visar att kolbindningen i en brukad skog ökas genom en ökad areal avsatt skog. Detta resultat nåddes med hjälp av Heureka PlanVis, som även använts i denna studie. Bylund undersökte även om en ökad areal avsatt skog för naturvårdsändamål och generell hänsyn medförde en högre kolbindning än dagens skogsbruk.

Bylund undersökte även effekterna på kolbindningar av att utöka vindkraftverk systemet i Sverige, då en viss del skog behöver avverkas för att etablera ett vindkraftverk (Bylund, 2015), dock sträcker sig denna analys utanför ramarna för denna studie.

I en studie genomförd av Gustav Stål vid SLU visar resultatet att den brukade skogen i norra Sverige ökar kolbindningen i både biomassa och träprodukter såsom timmer och biobränsle. Detta medför att klimatförändringen kan motverkas eftersom koldioxiden i atmosfären binds i skogen. Studien undersökte även huruvida utvecklingen av skogsbruket under de senaste 200 åren gett en negativ kolbalans eller inte. Resultaten visar att det under 1900 talet rådde en negativ kolbalans, men den hade balanserat sig igen omkring år 2001 (Stål, 2018).

1.10 HEUREKA PlanVis

I den här studien kommer beslutstödssystemet Heureka PlanVis att användas för att ta fram olika skötselprogram med kolbindning som fokus. På hemsidan för Sveriges lantbruksuniversitet beskrivs Hurekasystemet enligt följande: *“Heurekasystemet är en programserie utvecklad på SLU som låter användare göra en stor mängd olika analyser och planeringsansatser för skogsbruk. Systemet kan riktas mot ett flertal mål och göra kort- och långsiktiga prognoser av virkesproduktion, ekonomi, naturvård, rekreation och kolinlagring”* (SLU, 2017).

PlanVis används för långsiktig skogsbruksplanering, det kan användas för både stora och små skogsinnehav och är därför ett attraktivt verktyg för skogliga företag bl.a. SCA, Bergvik Skog, Holmen Skog etc. I PlanVis ingår både strategisk och taktisk planering som hjälper till att lösa problem som vad man ska göra och när man ska göra det (Lind, Göthlin, Mikusinski, 2016; SLU, 2017).

1.11 Syfte & Hypotes

Syftet med studien är att ta fram ett skötelsystem som maximerar kolbindningen i kommunens skogar utifrån givna begränsningar i form av policy och certifiering.

Hypotes; en brukad skog kommer binda mer kol eftersom tillväxten är högre.

2. MATERIAL OCH METODER

2.1 Material

Det material som användes i denna studie var; pcSkog, Heureka PlanVis, Excel och Kramfors kommuns skogsinnehav.

I denna studie användes Kramfors Kommuns skogar till alla analyser. Ingående tillstånd för skogsinnehavet visar att medelålder för skogen är 60 år och medelvolymen är ca 175 m³sk/ha. Trädslagsfördelningen för hela skogsinnehavet som är 2470,2 hektar har fördelningen ca 46 % gran, 34 % tall och resterande olika lövträdslag.

Analyserna gjordes efter de olika mål kommunen hade med kolbindningen och de krav som kommunen hade på skogen. Målet med kolbindningen beskrev kommunen på följande sätt; "Målet med själva kolbindningen är att på ett positivt sätt kunna dra nytta av ett litet skogsinnehav och föregå med gott exempel". Det huvudsakliga kravet kommunen hade på brukandet av skogen var att skogen skulle ge en ekonomisk avkastning på två miljoner kr/år.

Heureka PlanVis består av två huvudkomponenter där ena tar fram olika skötselalternativ genom simuleringar från TPGn (Treatment Program Generator). Skötselalternativen varierar utifrån de parametrar man väljer att använda för simuleringarna. Den andra viktiga komponenten är Optimeraren HOPS (Heureka Optimization Programming System). HOPS används för att optimera simuleringarna från TPGn samt löser problem som uppstår för att ta fram det bästa skötselalternativet (Heureka-Wiki 2008).

2.2 Metod

Skogsbuksamplanen för Kramfors kommuns skogsinnehav importerades till pcSkog för att sedan analyseras i programmet. Exportering av skogsbruksamplanen till Heureka PlanVis, analysering av Heureka-filen i excel för att säkerhetsställa att alla parametrar som krävs för PlanVis fanns med. Excelfilen saknade vissa viktiga parametrar för att PlanVis skulle kunna fungera korrekt. Parametrarna som saknades var grundyta, stamantal, höjd och medeldiameter, dessa parametrar räknades fram med ett antal olika formler för att filen skulle kunna användas i Planvis se bilaga 1 för beräkningarna.

Den redigerade excel-filen importerades till PlanVis. Första steget i PlanVis var att studera det ingående skogstillståndet och kontrollera så det stämde med skogsbruksamplanen, vilket det gjorde. Steg två var att skapa domäner för olika målklasser samt olika kontrollkategorier för varje målklass. Domänerna som skapades var 1 = NO, 2 = NS, 3 = PF och 4 = PG som var den befintliga domänen som av programmet kallades för "Other" innan den döptes om. Kontrollkategorierna som skapades var: Fri utveckling, Kontinuitetsskogsbruk, Gödsling 10 år innan slutavverkning och Contorta, vilket var en kontrollkategori för att förnygringsträdlaget skulle vara contorta och inte anpassat till ståndortsindex. Dessa kategorier kopplades sedan till de olika domänerna. Kontrollkategorin för fri utveckling kopplades till domänen NO och PG, kontinuitetsskogsbruk kopplades till NS, gödsling och contorta till PG. Nästa steg var att skapa olika domäninställningar med "Nature Conservation" som skulle kopplas till domänerna PF och PG. En domäninställning med förstärkt hänsyn där avsättning uppgick till 25% kopplades till PF och en domäninställning med generell hänsyn på 5% kopplades till PG.

När inställningarna var klara i TPG:n började simulering av skötselprogram. I den första simuleringen användes den befintliga skogsbruksplanens föreslagna skötselåtgärder de första 10 åren, denna simulering användes som referenssimulering. Andra simuleringen gjordes utan tidigare åtgärdsförslag. När simuleringarna var klara studerades de i simuleringsresultatet.

I optimeringen utformades optimeringsmodellen efter de olika krav och mål som fanns med optimeringen, restriktioner för certifierat skogsbruk lades till och restriktioner för skogsvårdslagen lades också till. Restriktionerna som fanns med i modellen var: AreaPerTrmtUnit, MaxAreaYoungForest, MinAreaOldForest, MinAreaFreedevelopment, MaxAreaRegeneratedwithContorta, MinNetRevenue, NoFertilizedAreaInLichenAreas, MaxAreaFertilized, MinHarvest och MaxHarvest. Förklaring av restriktionerna finns i bilaga 2.

Första optimeringen för referenssimuleringen gjordes för att maximera nuvärdet denna optimering kallades för "Referens_nuv" medan den andra för referensen gjordes för att maximera kolbindningen och kallades för "Referens_kol". Restriktionerna som var aktiva i båda optimeringarna var: AreaPerTrmtUnit, MaxAreaYoungForest, MinAreaOldForest, MinAreaFreedevelopment, MaxAreaRegeneratedwithContorta, MinNetRevenue, NoFertilizedAreaInLichenAreas. Nästa simulering kallades för "Kol_möjlig", denna optimering gjordes på simuleringen utan tidigare åtgärder och optimerades för att visa hur mycket kol som är möjligt att binda med restriktionerna: AreaPerTrmtUnit, MinAreaFreedevelopment, MinAreaOldForest, MaxAreaYoungForest. Sista optimeringen på simuleringen utan tidigare åtgärder kallades för "Kol_max" och optimerades för att maximera kolbindningen utifrån kommunens mål med skogen, restriktioner som var aktiva i denna optimering var: AreaPerTrmtUnit, MaxAreaYoungForest, MinAreaOldForest, MinAreaFreedevelopment, MaxAreaRegeneratedwithContorta, MinNetRevenue. Optimeringarna studerades sedan i optimeringsresultatet.

3. RESULTAT

Kramfors kommuns skogsinnehav har ett nuvärde på 4 207 1,1 kr per hektar och skogen binder ca 125 tusen ton kol dvs 125 miljoner kg kol ovan jord i dagsläget (Tabell 1).

Tabell 1. Totalt nuvärde och nuvärde per hektar för optimeringen Referens_nuv och total kolbindning ovan jord, dvs totalkolbindning i träden, för optimeringen Referens_kol.

Table 1. Total net present value and net present value per hectare for the optimization "Referens_nuv" and total carbon sequestration above ground, i.e. total carbon sequestration in the trees, for the optimization "Referens_kol".

Referens		
Totalt nuvärde (SEK)	Nuvärde per ha (SEK/ha)	Total kolbindning ovan jord 2019, ton C (10 ³)
1 039 240 34, 960	4 207 1,1	12 490 7,3

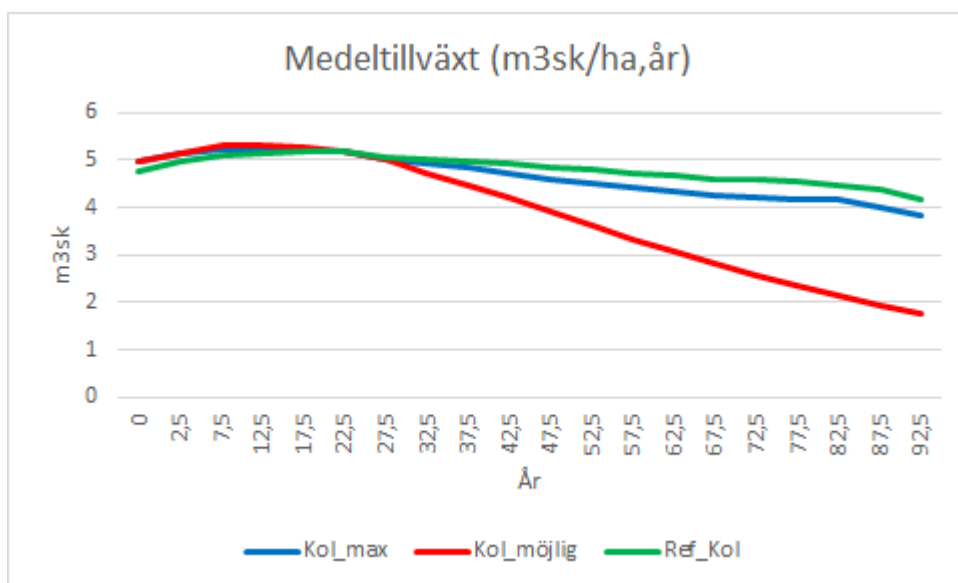
Skötselöverslagen fördelades inom målklasserna på följande vis, NO sköts enbart genom fri utveckling, NS genom kontinuitetsskogsbruk, PF sköts genom "Default" med förstärkt hänsyn dvs, med traditionellt trakthyggesbruk med 25% avsättning och målklassen PG sköts med modifierat trakthyggesbruk enligt tabell 2.

Tabell 2. Kol_max hade fördelningen mellan skötselöverslag att 8,25% av det totala skogsinnehavet på 2470,2 hektar sköts med trakthyggesbruk där förnyringsträdslagen är ståndortsindex specificerat dvs gran eller tall, 39,38% lämnas för fri utveckling, 46,7% gödglas och 5,2% förnygras med contorta istället för tall eller gran. Kol_möjlig hade fördelningen att 99,1% lämnas för fri utveckling. Referens_kol hade fördelningen att 12,7% sköts med trakthyggesbruk, 33% lämnas för fri utveckling, 48% av markinnehavet gödglas och 6,2% förnygras med contorta.

Table 2. The optimization "Kol_max" had the distribution between management proposal that 8,25% of the total forest holding on 2470,2 hectares is managed with even-age program was the regenerated species adapted to site index i.e. Scots Pine and Norwegian Spruce, 39,38% was left for free development, 46,7% was fertilized and 5,2% was regenerated with Lodgepole pine instead of Scots Pine or Norwegian Spruce. The optimization "Kol_möjlig" had the distribution that 99,1% was left for free development. The optimization "Referens_kol" had the distribution that 12,7% is managed with even-age program, 33% was left for free development, 48% of the forest holding was fertilized and 6,2% was regenerated with Lodgepole pine.

Fördelning av skötselöverslag i målklass PG				
	Trakthyggesbruk med tall & gran	Fri utveckling	Gödsling (på tall- & grammarker)	Contorta
Kol_max	8,25%	39,38%	46,7%	5,2%
Kol_möjlig	0,05%	99,1%	0,21%	0,63%
Referens_kol	12,7%	33%	48%	6,2%

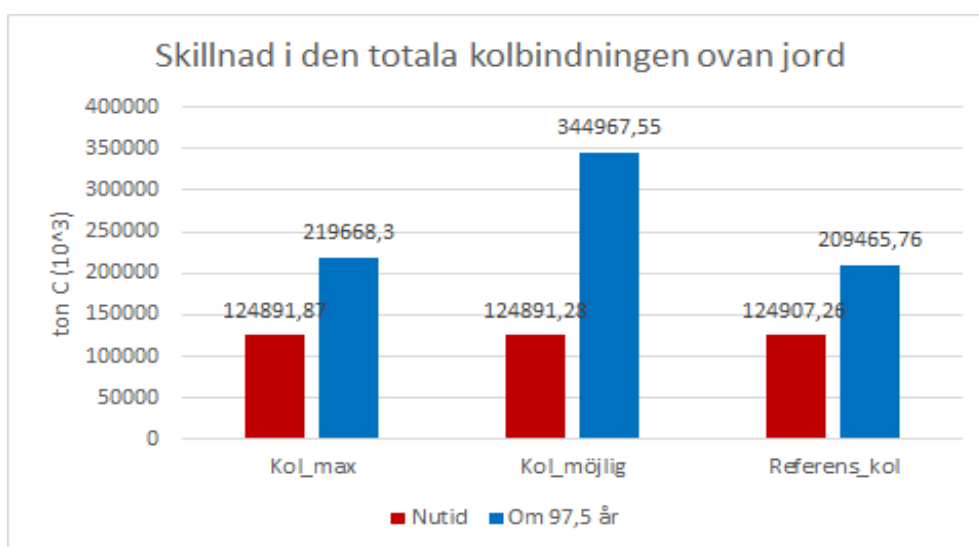
Medeltillväxten per hektar för optimeringarna och de olika skötseltyperna visar att skogen för samtliga optimeringar och skötseltyper börjar med en medeltillväxt på ca 4,8 m³sk/ha,år och ökar något i ca 20 år till 5,2 m³sk/ha,år. Efter 20 år nås vändpunkten och tillväxten avtar, för Kol_möjlig avtar tillväxten som mest och går ner till ca 1,8 m³sk/ha,år efter 92,5 år medans för Kol_max och Referens_kol går tillväxten endast ner till ca 4 m³sk/ha,år (Figur 4).



Figur 4. Hur mycket skogen växer i skogskubikmeter per hektar och år.

Figure 4. How much the forest grows in cubic metres per hectare and year.

Skillnaden i den totala kolbindningen ovan jord för de olika optimeringarna visar att om skogen sköts med optimeringen Kol_max kommer kolbindningen att öka med 75,8% från 2019 och 97,5 år framåt medan om skogen sköts med Kol_möjlig kommer kolbindningen att öka med 176% samt om skogen sköts likande som den gör i dagsläget kommer kolbindningen att öka med 68% från idag (Figur 5).



Figur 5. Skillnaden i den totala kolbindningen ovan jord från idag - 97,5 år framåt. Y-axeln visar tusentals ton kol och X-axeln visar olika optimeringar (Kol_max, Kol_möjlig och Referens_kol).

Figure 5. The difference in total carbon sequestration below ground today and 97,5 years from now. The Y-axis shows thousands of tonnes of carbon and the X-axis shows different optimizations.

Skillnaden i kolbindning per hektar för olika skötseltyper i optimeringen Kol_max visar att om skogen lämnas till fri utveckling kommer den om 97,5 år att binda ca 135 ton kol per hektar, vilket är ca 78% mer än skötseltypen där föryngringsträdslaget är contorta och ca 141% mer än om trakthyggesbruket skulle vara den huvudsakliga skötseltypen. Medelvärde i kolbindning för Kol_max är 88,93 ton kol per hektar (Figur 6).

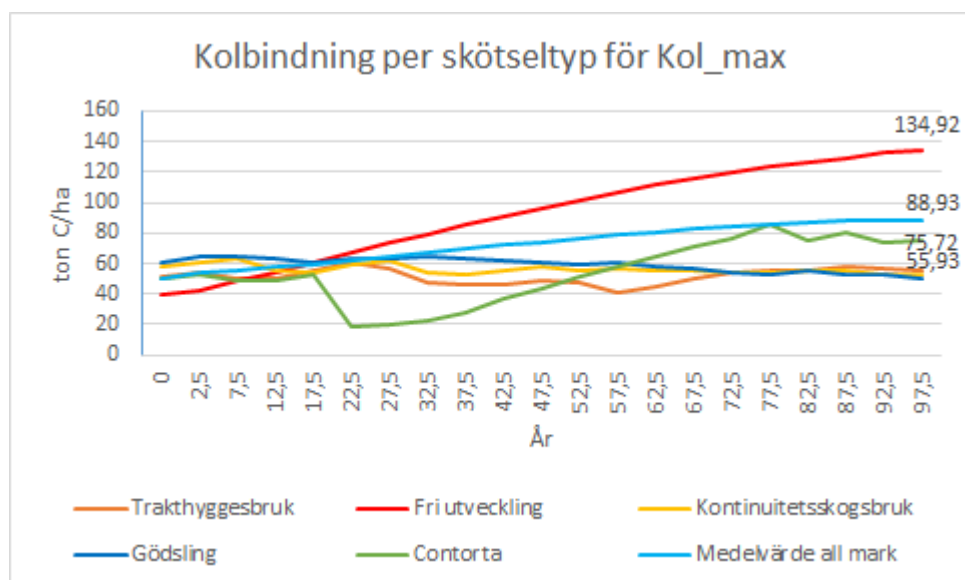


Figure 6. Hur många ton kol det binds per år i varje skötseltyp. Trakthyggesbruk med föryngringsträdslag tall & gran, contorta är trakthyggesbruk med föryngringsträdslag contorta, gödsling är gödslad areal i trakthyggesbruket.

Figure 6. How many tonnes of carbon is sequestered each year per managementtype. Even-aged program with Scots Pine and Norway spruce as regeneration species, even-aged program with Lodgepole pine as regeneration species and fertilized area in the even-aged program.

4. DISKUSSION

4.1 Jämförelse med tidigare studier

Resultat från denna studie liknar Anna-Ida Bylund resultat, att ju mer areal som lämnas för fri utveckling desto mer kol binds in i skogen (figur 6). Detta beror på att skog som lämnas till fri utveckling får en högre volym biomassa än en skog som sköts med något aktivt skogsbruk, och enligt denna studie är det volymen biomassa som spelar störst roll för kolbindningsförmågan. En hög volym biomassa medför en hög kolbindningsförmåga.

Studien Gustav Stål genomförde handlade om hur skogsbrukets utveckling påverkat kolbalansen snarare än vilken skötsel som gav störst kolbindning, vilket gör det svårt att jämföra studierna. Studien som Stål utförde talar för ett aktivt skogsbruk för en bra kolbalans, medan vår och Bylunds studie pekar på ett skogsskötselsystem med fri utveckling. Detta kan bero på att studierna syftar till olika saker, Gustav undersökte hur skogen som kolsänka förändrats i och med skogsbrukets utveckling, medan Bylund och vi undersökte hur skogen bäst kan fungera som kolsänka.

4.2 Hur mycket kol binds i skogen?

Optimeringen Kol_max och dess skötselprogram binder totalt 21 966 8,3 ton kol i skogen om 97,5 år för hela skogsinnehavet (figur 5), vilket är det skötselprogram som är utformat efter kommunens mål samt krav. Det optimala skötselprogrammet för att maximera kolbindning är att lämna så mycket som möjligt till fri utveckling enligt optimeringen kol_möjlig (figur 5). Denna optimeringen och dess skötselprogram binder totalt 344 967 ,55 ton kol jämfört med optimeringen referens_kol som endast binder 209 465 ,76 ton kol. Optimeringen visar att skillnaden i kolbindning mellan Referens_kol och Kol_max bara skiljer 7,8% om 97,5 år, vilket är en lägre ökning än vad vi trodde innan, detta tyder på att skötselprogrammet i dagsläget ändå har en välanpassad plan för skogsbruket som även lyckas binda mycket kol.

Resultatet förvånade oss något då vi trodde att hög tillväxt hörde ihop med hög kolbindningsförmåga, eftersom trädet binder kolet i biomassan under sin tillväxt. Något som kan komma att påverka kolbindningen negativt är om koldioxidhalten i atmosfären ökar, vilket medför att fotorespirationen gynnas. En ökad fotorespiration medför att trädet binder mindre koldioxid eftersom det förlorar energi och resurser på fotorespirationen.

4.3 Hur påverkas kolet av olika skötselåtgärder?

I det långa loppet binder trakthyggesbruket mer kol än både kontinuitetsskogsbruket och skötselprogrammet med gödsling. Dock har skötselprogrammet med contorta som föryngringsträdslag samt skötselprogrammet med fri utveckling en högre kolbindning än trakthyggesbruket där föryngringsträdslaget är tall och gran. Skötselprogrammet med fri utveckling är det som binder mest kol, eftersom det aldrig blir någon förlust av biomassa vid avverkning. Huruvida det sker förluster av biomassa i skötselprogrammet med fri utveckling, i form av träd som dör och ruttnar, och i så fall hur stora de är, är svårt att beräkna då det inte finns något verktyg för det i Heureka.

Att skötselprogrammet med contorta som föryngringsträdslag har en högre kolbindning än trakthyggesbruket med gran och tall samt kontinuitetsskogsbruket, kan förklaras genom trädslagets höga tillväxt och stora mängd biomassa.

Skötselprogrammet med gödsling gav inte en högre kolbindning än vanligt trakthyggesbruk, vilket säger emot bland annat (Bergh och Lindroth 2018) som konstaterat att gödslingen borde ha en stor positiv effekt på kolbindningen.

Att trakthyggesbruket binder mer kol än kontinuitetsskogsbruket var väntat eftersom tillväxten är högre med trakthyggesbruket. På kortare sikt är kontinuitetsskogsbruket bättre (figur 6), detta beror på att tillväxten i trakthyggesbruket är väldigt låg mellan kalmarsfasen och ungskogsfasen. Gödslingen gav en kortvarig effekt och den genomfördes heller inte regelbundet i alla skötselprogram, vilket medför att det är svårt att jämföra huruvida gödslingen påverkat på kort sikt.

4.4 Vilket skötelsystem bör kommunen välja?

Eftersom Kramfors Kommun vill sköta skogen aktivt enligt skogsvårdslagen samt med specifika krav, bland annat avkastningskrav och certifieringskrav, kommer vi inte att föreslå att de tillämpar skötselprogrammet med fri utveckling. Fri utveckling innebär utebliven avkastning eftersom ingen avverkning sker. En stor del av kommunens skogar är redan avsatta till naturvårdsändamål samt naturreservat, vilket bidrar till kolsänkan. Det vi kommer rekommendera kommunen är att välja alternativet Kol_max då det både är skapat efter deras mål med avkastningskrav och efter ett certifierat skogsbruk samt att det binder mer kol än vad kommunens nuvarande brukningssätt gör.

Genom att optimera innehavet för koldioxidbindningen sker både en reduktion av växthusgaser samtidigt som det kommer skogen tillgodo där återvinningsbara produkter kan skapas. Därför är det ett bra sätt att föregå med gott exempel som kommun genom att välja ett skogsbruk där kolbindningen ökas genom ett väl anpassat skogsbrukssätt.

4.5 Styrkor och svagheter med studien

En svaghet i studien som bör tas i åtanke är att PlanVis inte tar hänsyn till att klimatet förändras och på så vis även förändringar av tillväxt säsongen. Detta kan medföra att resultaten för optimeringarna blir bristande då ett varmare klimat kan sänka slutavverkningsåldern vilket påverkar kolbindningen och tillväxten i skogen. Om slutavverkningsåldern sänks kommer det bli fler tillfällen som marken är kal, och detta är något som kommer påverka klimatet eftersom det blir fler tillfällen som koldioxid kommer avgå till atmosfären. Om denna effekt av lägre slutavverkningsålder endast är negativ är svårt att säga, varmare klimat kan även bidra till högre tillväxt vilket medför att mer kol kan bindas in snabbare i skogen än innan vilket jämnar ut den ökade avgången till atmosfären.

En annan svaghet är att PlanVis bara kan göra analyser ovanför marken, vilket gör att vi inte kunde analysera hur kolbindningen påverkades under marken, till exempel hur gödslingen påverkar rotbiomassa. Detta gjorde att vi inte kunde få dem exakta siffrorna på hur mycket kol som binds in totalt i marken plus i träden, vilket gör att studien inte blir heltäckande för skogens kolbindning.

Kol- och klimatfrågor är ett hett ämne och studien ligger bra i tiden, det kommer behövas fler studier på dessa ämnen då skogsbruket förnyas och klimatet förändras.

En annan svaghet med denna studie som också är en felkälla är att ingen hänsyn tagits till kommunens tätortsnära skogar, vilka inte kan skötas på samma sätt som en vanlig produktionsskog. Det finns ännu inget verktyg i PlanVis som stödjer simuleringen av skötsel för tätortsnära skogar, vilket i kombination med tidsbrist, bidrog till att vi inte tagit hänsyn till dessa skogar. Om dessa tätortsnära skogar hade tagits hänsyn till i analyserna och haft en annan typ av skötsel än den som genererades för skogsinnehavet skulle det kunna påverka kolbindningen beroende på hur vilken typ av skötsel man genererat till de tätortsnära skogarna.

4.6 Slutsatser

Skogen med den högsta tillväxten var inte den som medförde högst kolbindning, utan skogen med störst andel biomassa binder mest kol. Fri utveckling ger därmed högst kolbindning på grund av den höga volymen biomassa som finns tillgänglig och skog som lämnas för fri utveckling binder därför mer kol jämfört med brukad skog. Då ett skötselprogram där man nästan avsätter all skog inte är ett alternativ för kommunen rekommenderar vi dem att välja skötselprogrammet som tagits fram genom optimeringen Kol_max.

5. REFERENSER

- André och Bondesson 2014. *Hur en ökad marktemperatur påverkar fotosyntes och markrespiration i en boreal skog* Uppsala: SLU, Institutionen för mark och miljö[online] tillgänglig: <https://stud.epsilon.slu.se/7498/> [2019-04-30]
- Bellassen och Luyssaert 2014. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times [online] tillgänglig: <https://www.nature.com/news/carbon-sequestration-managing-forests-in-uncertain-times-1.14687> [2019-03-01]
- Bernstein et al. 2007 Climate change 2007 synthesis report, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change [online] tillgänglig: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf [2019-04-20]
- Bergh, Linder, Morén, Grelle, Lindroth, Roberntz 2000. Skogens kolbalans- många faktorer inverkar, Umeå, SLU nr 15 2000 [online] tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskn/popvet-dok/faktaskog/faktaskog00/s00-15.pdf> [2019-03-09]
- Bergh och Lindroth 2018. Går det att enas om skogens klimatnytta? Göteborg, Skogssällskapet [online] tillgänglig: <https://www.skogssallskapet.se/kunskapsbank/artiklar/2018-03-07-gar-det-att-enas-om-skogens-klimatnytta.html> [2019-04-22]
- Bylund, Anna-Ida 2015. Kolbalansen vid olika skötselstrategier för skogen på Tagels fastighet, Kalmar/Växjö: Linnéuniversitetet; Institutionen för Skog och träteknik [online] tillgänglig: <http://lnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:821956/FULLTEXT01.pdf> [2019-04-06]
- Cedergren 2008. Kontinuitetsskogar och hyggesfritt skogsbruk, Jönköping, Skogsstyrelsen nr 1 2008 [online] tillgänglig: <http://shop.skogsstyrelsen.se/sv/publikationer/meddelanden/kontinuitetsskogar-och-hyggesfritt-skogsbruk-meddelande-2008-1.html> [2019-03-08]
- Eichhorn och Evert 2013. *Biology of plants* 8. uppl. kapitel 7 s. 124 New York: W.H Freeman and Company
- ICOS 2018. NETWORK AND MEASUREMENT [online] tillgänglig: <http://www.icos-sweden.se/station.html> [2019-03-24]
- Iversen och Prasad 2001. Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types following Climate Change, New York, Springer- Verlag, volym 4 upplaga 3[online] tillgänglig: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-001-0003-6> [2019-03-28]
- Klimatet och skogen 2017. Kolcykeln och skogen [online] tillgänglig: <http://klimatetochskogen.nu/bakgrundsinformation/kolcykeln> [2019-05-01]
- Lindner och Karjalainen 2007. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: A short review of recent progress, Springer- Verlag, *European Journal of Forest Research* [online] tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/225644026_Carbon_inventory_methods_and_carbon_mitigation_potentials_of_forests_in_Europe_A_short_review_of_recent_progress [2019-03-12]
- Lindroth mfl. 2017. Early snowmelt significantly enhances boreal springtime carbon uptake, USA, *National Academy of Sciences* [online] tillgänglig: <https://www.skogen.se/nyheter/tidig-var-okar-skogens-kolbindning> [2019-04-11]
- Lundmark et.al 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation, Basel Forests nr 5 [online] tillgänglig: <https://www.mdpi.com/1999-4907/5/4/557/htm> [2019-03-02]
- Morén, Grelle, Lindroth 2000. Kolbalansen i svenska skogar, Umeå SLU nr 2 2000 [online] tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskn/popvet-dok/faktaskog/faktaskog00/s00-02.pdf> [2019-03-11]
- Nadelhoffer et.al 1999. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests, *Nature* 398 [online] tillgänglig: <https://www.nature.com/articles/18205> [2019-02-28]
- Naturskyddsföreningen 2011. Hugga eller skydda- boreala skogar i klimatperspektiv, Stockholm, Svenska naturskyddsföreningen [online] tillgänglig: https://www.naturskyddsforeningen.se/sites/default/files/dokument-media/rapporter/Rapport_Hugga_eller_skydda.pdf [2019-03-02]

- Naudts, Chen, McGrath, Ryder, Valade, Otto och Lyassert 2016. Europe's forest management did not mitigate climate warming, Science nr 5 2016 [Online] tillgänglig: <http://science.sciencemag.org/content/351/6273/597> [2019-03-27]
- Nilsson H. 2010. Den globala uppvärmningen – Vad kommer att hända med morgondagens värld? Uppsala: SLU Institutionen för Ekologi [online] tillgänglig: https://stud.epsilon.slu.se/1802/1/nilsson_h_100911.pdf [2019-04-30]
- R. De Long, Dorrepaal, Kardol, Nilsson, M. Teuber, Wardle 2016. Boreal forests in a warmer world, Umeå SLU nr 3 2016 [online] tillgänglig: https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskn/popvet-dok/faktaskog/faktaskog16/faktaskog_03_2016_en.pdf [2019-03-11]
- Skogsstyrelsen 2014. Skogsskötselserien - Slutavverkning, Jönköping, Skogsstyrelsens förlag nr 20 [online] tillgänglig: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/mer-om-skog/skogsskotselserien/skogsskotsel-serien-20-slutavverkning.pdf> [2019-05-01]
- Skogsstyrelsen 2018. Skogen lagrar kol, Jönköping Skogsstyrelsen [online] tillgänglig: <https://www.skogsstyrelsen.se/miljo-och-klimat/skog-och-klimat/skogen-lagrar-kol/> [2019-03-22]
- SLU Heureka 2018. Om Heurekasystemet, SLU [online] tillgänglig: <https://www.slu.se/institutioner/skoglig-resurshushallning/programprojekt/sha/heureka/heureka/om-heureka/> [2019-03-15]
- Stål, Gustav 2018. Carbon budgets in northern Swedish forests, 1800-2013 Umeå: SLU, Institutionen för skogens ekologi och skötsel [online] tillgänglig: https://stud.epsilon.slu.se/13319/8/stal_g_180504.pdf [2019-03-03]
- PlanVis 2008. About PlanWise, Heureka wiki [online] tillgänglig: https://www.heurekaslu.se/wiki/About_PlanWise [2019-03-15]
- Zetterlund, Clara 2017. Barrträd – framtidens stadsträd? en studie av klimatförändringarnas påverkan på barrträd i Malmö till år 2100 Alnarp SLU: Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning [online] tillgänglig: https://slu.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=alma9919295125105121&context=L&vid=46SLUB_INST:SLUB_V1&lang=sv&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Eeverything&query=any,contains,tr%C3%A4dens%20fotosyntes&sortby=rank&mode=Basic [2019-04-05]
- Peda.net (u.å). Fotosyntes [online] tillgänglig: <https://peda.net/p/rune.byggningsbacka/kemi/nk> [2019-04-11]

6. Bilagor

6.1 Bilaga 1. Kramfors register – beräkningar där data saknas

1. Tar bort alla skikt med huggningsklass ÖF – en förenkling. Fungerar inte så bra i PlanVis med sådana bestånd.
2. Höjd för avdelningar tas från Skogliga grunddata beräknat som medel per avdelning i HKL G1 och äldre. K1 Och K2 H = 0
3. Beräkning av formhöjd (FH, m)

Om SiteIndexSpecies = 1:

$$FH = 0.44 \times OH + \left(\frac{OH}{OH - 1.3} \right)^2 - 1$$

(Elfving, 2007)

Om SiteIndexSpecies = 2:

Om $SI < 18$: $N_{nom} = 1500$, Om $18 \leq SI < 22$: $N_{nom} = 1700$, Om $22 \leq SI < 26$: $N_{nom} = 2000$

Om $26 \leq SI < 30$: $N_{nom} = 2300$, Om $30 \leq SI < 34$: $N_{nom} = 2500$, Om $SI \geq 34$: $N_{nom} = 2800$

$$FH = \exp(-0.9204 - 0.0286 \times \ln(1850)) + 0.8294 \times \ln(OH) + 0.2265 \times \ln(SI)$$

(Pettersson, 1992)

4. Beräkning av volym via $G = V/FH$
5. Om Huggningsklass K1 sätt H, DG, Volym till 0
6. Om Huggningsklass K2: Höjd = 2 respektive = 1 m beroende på ålder och volym. För högre volymer FH till 5.0
7. För R1 skog: Stamantal beräknas där volym under $40 \text{ m}^3/\text{sk}/\text{ha}$ enligt
 $N = 5742.5 - 94.201 \times \text{MeanAge}$

6.2 Bilaga 2 - förklaring av restriktioner

AreaPerTrmtUnit – Area Per Treatment Unit

- All areal kommer med i optimeringen, varken mer eller mindre per behandlingsenhet (Ureatment Unit).

MaxAreaYoungForest – Max areal med ungskog.

- Hur mycket av den totala arealen av fastigheten som får bestå av ungskog (0,5x total areal).

MinAreaOldForest – Lägsta andel gammal skog.

- Hur mycket av den totala skogsarealen som minst måste bestå av gammal skog (0,5x total areal).

MinAreaFreedevelopment – Lägsta andel skog som lämnas till fri utveckling.

- Skogsbrukare skall undanta minst 5% av sin produktiva skogsmarksareal från andra åtgärder än skötsel påkallad för att bevara och främja biotopens naturliga eller hävdvetingade biologiska mångfald.

MaxAreaRegeneratedWithContorta – högsta areal förnygrad med contorta.

- Skogsbrukare ska begränsa eventuell användning av främmande trädslag så att den totala arealen nyanlagda bestånd med främmande trädslag från 2009 högst uppgår till 5 % av den produktiva skogsmarksarealen.

MinNetRevenue – Lägsta ekonomiska avkastning (per period).

- Den lägsta ekonomiska avkastningen per period ska vara 10 miljoner kr, dvs 2 miljoner kr per år.

NoFertilizedArealnLichenAreas – Ingen gödsling på lavrika marker.

- Gödsling på lavrika marker får inte ske på grund av hänsyn till rennärningen.

MaxAreaFertilized – Max gödslad areal

MinHarvest – Lägsta andel avverkning per period.

- Den avverkade volymen får inte understiga föregående års avverkade volym med mer än 10 % (för att få jämnt virkesflöde).

MaxHarvest – Högsta andel avverkning per period.

- Den avverkade volymen får inte överstiga föregående års avverkade volym med mer än 10 % (för att få jämnt virkesflöde).